

## MR流体ブレーキ膝継手を用いた随意制御大腿義足に関する研究開発

著者	引地 雄一
号	56
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4687号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/61571">http://hdl.handle.net/10097/61571</a>

氏 名	ひきちゆういち 引地 雄一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成24年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) バイオロボティクス専攻
学位論文題目	MR流体ブレーキ膝継手を用いた随意制御大腿義足 に関する研究開発
指導教員	東北大学教授 中野 政身
論文審査委員	主査 東北大学教授 中野 政身 東北大学教授 田中 真美 東北大学教授 早瀬 敏幸 東北大学教授 西山 秀哉

## 論文内容要旨

事故や疾病などにより、膝より上部(大腿部)で下肢の切断術を行った患者は、立位・歩行のために大腿義足という義足を使用するが、膝の伸展・屈曲筋力を失ってしまうため常に転倒の危険性がある。そのため、大腿義足の主要なパーツである膝継手には転倒防止機能としていろいろな機能を装備した製品が販売されているが、それらは義足の膝を屈曲した状態で体重を支えることができないため、階段や坂を交互のステップの歩行で昇ることはできない。現在階段を交互のステップで昇ることのできる大腿義足は、コンピュータで制御されたアクチュエータで能動的に駆動する膝継手を使用したものだけであり、米国において POWER KNEE という製品が市販されているが、非常に高価であり、また重く、長さや太さの制限があるため使用できる人が極めて制限される。また、POWER KNEE においても使用者が膝継手の状態や抵抗力を随意に変えることはできない。

本研究は、外部磁場によって粘性(厳密には、降伏せん断応力)の変化するMR流体を用いたブレーキを膝継手に活用することによって、大腿義足使用者が随意に膝の抵抗をコントロールし、Yielding や任意の膝角度でのLockを可能とする随意制御大腿義足(MR-SPCOM: MR fluid brake-Stance Phase Controlled by Optional Motion knee)を開発することを目的としている。本論文は、構造やセンサそして制御スキームの異なる3種類の開発された随意制御大腿義足の研究成果をまとめたものであり、全編5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と開発の目的・これまでの経過等について述べている。本研究の先行研究として、当初は油圧シリンダーを使用し、膝軸とソケットの間に置いたスライド機構によって油圧バルブの開閉を行い、膝継手の状態をコントロールするタイプを開発し試歩行等を行っていた。このタイプは、HYSCOM(Hydraulic Stance phase Controlled by Optional Motion)膝と称し、随意制御によって実際に階段の交互ステップの昇りと下りの歩行を実現することができた。本研究では、より高度な歩行・動作を行うためにスライド機構と油圧バルブをロードセル、制御系及び電源に、油圧シリンダーをMR流体ブレーキに置き換えて、コンピュータを用いた電子制御を導入した『電子制御MR-SPCOM膝継手』を開発することを目的としている。

第2章では、MR-SPCOM 1号機（図1）に関して、その開発と構造・試歩行試験とその結果について考察している。開発については、まず、膝継手を屈曲位でLockするのに必要とされる制動トルクを計算し、MR流体ブレーキの磁場解析を援用した設計を行い予想される制動トルクを求めて条件を満たすことを確認したうえで、実際に製作したブレーキについて実験を行い制動トルクの計測を行った。また、使用者の随意制御力を検出するためのロードセルの開発を行い、ロードセルとセンサ類から得られるデータからMR流体ブレーキを制御する制御系の構築を行った。これらを搭載したMR-SPCOM 1号機を使用した大腿義足を装着して、試歩行用に製作した階段と坂道の上で実際に被験者が試歩行を行った結果、随意制御によって膝を屈曲させた状態でLockさせ、被験者の全体重をかけて支えながら歩行をすることができた。さらに、完全なLockのためにロックモードを使用し、階段及び坂の両方において交互ステップによる昇りと下りの歩行が行えることを確認した。

第3章では、ロードセルの改良とセンサ・制御スキームを見直したMR-SPCOM 1号機改（図2）を開発し、その理論と構造・歩行と動作解析を行った結果について考察している。ロードセルに関しては、より随意制御性を高めるために構造と随意制御力検出の原理に関する力学的理論展開について考察し、その理論を組み込んだ改良型ロードセルを新規に開発した。さらに足接地センサを増設し、それらに伴い制御スキームを見直すこととした。この改良により、MR-SPCOM 1号機改においてはより確実な随意制御が得られ、ロックモードを廃止しても安定した階段の交互ステップによる昇りと下りの歩行を行えた他、椅子に座る途中で一度膝をロックさせて止め、その後解除して座るという動作が可能となった。これは、動力を持たない義足としては、新規性の高い重要な成果である。なお、歩行・動作解析機器についても新たに導入を行い、得られたデータについて検討を行った結果、改良による成果と今後の課題を明確にすることができた。

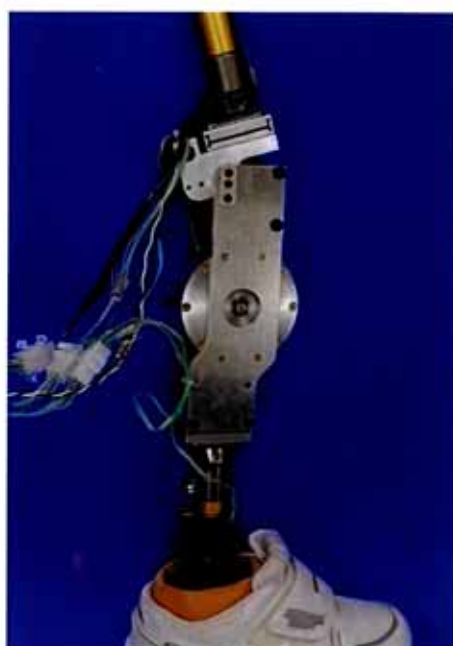


図1 MR-SPCOM 1号機

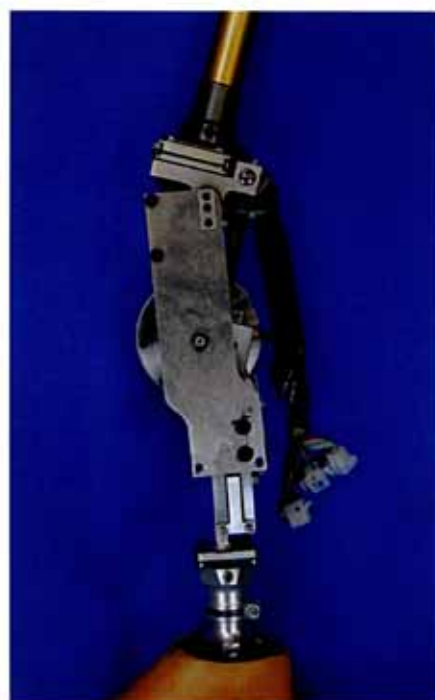


図2 MR-SPCOM 1号機改



第4章では、軽量・コンパクトなMR流体ブレーキ（図3）を新たに開発して、MR-SPCOM 2号機（図4）を新しく設計・開発し、歩行・動作試験を行い得られた結果について考察している。2号機に関しては、より高度な歩行・動作のための制御を行う事と、足関節が半固定でありつま先立ちになってしまう事による弊害の改善、そして義足の軽量化を目的とし義足全体の見直しを行う事とした。

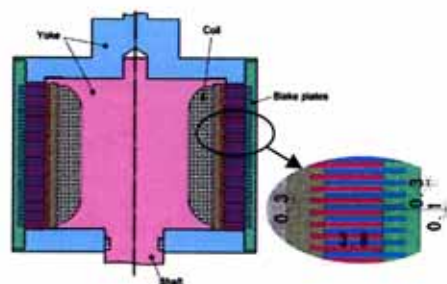


図3 新MR流体ブレーキ

まず、ロードセルにおいては、随意制御力をより正確に取り出すためにロードセルに加わる力の力学モデルに基づく分析と適正な補正方法を検討し、プログラムの見直しを行った。MR流体ブレーキに関しては、構造を見直してより軽量で小型のブレーキを設計し磁場解析・制動トルクの予測を行い、実際の制動トルクを計測した。そして、そのブレーキを使用することを前提に制動トルク伝達機構も新たに開発した。さらに、つま先立ちになってしまう事による弊害の改善のために膝と足関節が連動する構造を取り入れ、足関節・足部・リンク機構を含めて新たに開発を行った。



図4 MR-SPCOM 2号機

同MR-SPCOM 2号機において歩行・動作解析を行った結果、MR-SPCOM 1号機改に比較してさらに安定した階段の昇りと下りの両方の交互ステップによる歩行の他、25度という急な坂の昇りと下りの交互ステップの歩行が可能となった。さらに、座位を取る動作の途中で自由に複数回のLockとYieldingの切り替えが可能となるなどの大きな成果を得た。これは、過去に例を見ない有効かつ極めて重要な成果である。

第6章は結論である。本論文による結論として、開発したMR-SPCOM 膝継手を使用した大腿義足の歩行能力に関しては、安定した階段の交互ステップによる昇りと下りの歩行に加えて、傾斜が25度の急坂でも安定して交互ステップで歩行できたことなど、既存の大腿義足と比較して、大きな歩行能力の向上が実現できた。さらに、随意制御によって膝関節の確実なLockとYieldingの切り替えの実現が可能となったことにより、転倒の危険性を大幅に減らすことができた他、日常生活の中で頻繁に行う動作のひとつとして、しゃがみ込んだり椅子に座る動作などにおける、健足への負担を減らすことができることを明らかにすることができた。

また、MR流体ブレーキに関しては、制御プログラムによって膝の抵抗を自由にコントロールし、Yieldingや任意の膝角度でのLockを可能とすることのメリットを示すことができたが、今後、無電流時の制動力の低減、使用電力の低減、Lock後の解除特性の向上や、電源喪失の際のフェイルセーフの問題などの更なる改善が必要とされる。

現在販売されている大腿義足の膝継手は、そのほとんどが平地での歩行でその能力を発揮することを前提に製作されている。しかし実際の生活・就労環境、公衆道路においては段差や坂・階段等が数多く存在するため、そのような路面状況における歩行や動作についても開発条件として考慮すべきである。本研究で開発した義足はこれまでバリアとなっていた路面状況における大腿義足使用者の移動能力を飛躍的に高めると共に、大腿切断者のQOLを大きく向上させるものである。

# 論文審査結果の要旨

事故や疾病などにより膝より上部(大腿部)で下肢の切断手術を施された患者は、大腿義足を使用することになるが、膝の伸展・屈曲筋力を失うことにより常に転倒の危険性があること、階段や坂を交互ステップで昇ることが困難であることなど、健常者と比較して大きなハンデを背負っている。本研究は、外部磁場によって粘性(厳密には、降伏せん断応力)の変化するMR流体を用いたブレーキを膝継手に活用することによって、大腿義足使用者が随意に膝の抵抗をコントロールし、Yielding や任意の膝角度でのLockを可能とする随意制御大腿義足(MR-SPCOM: MR fluid brake-Stance Phase Controlled by Optional Motion knee)を開発することを目的としている。本論文は、構造やセンサそして制御スキームの異なる3種類の開発された随意制御大腿義足の研究成果をまとめたものであり、全編5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、開発された膝継手をロックする初期型MR流体ブレーキと使用者の随意制御力を検出する初期型ロードセル、それらを搭載したMR-SPCOM 1号機についての説明を行い、その歩行試験の結果について考察をしている。本MR-SPCOM 1号機は、随意制御によって膝を屈曲させた状態でロックさせ被験者の全体重をかけて支えることができること、ロックモードの導入により階段及び坂の両方において交互ステップによる昇りの歩行が行えることを示している。これらは、動力を持たない義足としては有用な成果である。

第3章では、より随意制御性を高めるために開発された体重の補正が可能な改良型ロードセルの構造と随意制御力検出の原理、見直された制御スキーム、さらに増設された足接地センサ、それらが搭載されたMR-SPCOM 1号機改についての説明を行い、その歩行・動作試験解析結果について考察している。本MR-SPCOM 1号機改においては、より確実な随意制御が実現でき、ロックモードを廃止しても安定した階段の交互ステップによる昇りの歩行が行えること、義足に体重をかけながら座位を取る途中で一度膝をロックさせて止めるという動作が可能となったことを示している。これらは、動力を持たない義足としては、非常に新規性の高い重要な成果である。

第4章では、開発された改良型ロードセルの力学モデルに基づいたより高い精度で随意制御力を検出する補正方法の提案、膝と足関節の連動機構の導入、さらに軽量・コンパクトなMR流体ブレーキ(2型)の開発、それらが搭載された新たに開発されたMR-SPCOM 2号機などについて述べ、その歩行・動作試験解析結果について考察している。本MR-SPCOM 2号機においては、さらに安定した階段歩行のほか、25度という比較的急峻な坂の昇りの交互ステップの歩行が可能となったこと、また、座位の途中で随意制御により自由にLockとYieldingの切り替えが可能となったことなどを提示している。これらは、過去に例を見ない有効かつ極めて重要な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、MR流体ブレーキを活用した抵抗可変型膝継手を用いた随意制御大腿義足を提案・開発し、その歩行・動作機能の著しい向上を達成して、大腿義足使用者の歩行能力を高め行動範囲を飛躍的に広げるとともに、大腿切断者のQOLを大きく向上させる技術を提案するもので、バイオロボティクスおよび機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。